تحلیل تجربی و عددی فرآیند هیدروفرمینگ لوله با فشار نوسانی در قالب جعبه‌ای شکل*

محسن لوح موسوی[۱]   محمد بخشی جویباری[۲]   کن ایچیرو موری[۳]   محمود فرزین[٤]   سید جمال حسینی پور[٥]

چکیده *در سال‌های اخیر، فرایند هیدروفرمینگ لوله برای کم کردن وزن و افزایش استحکام قطعات، مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است. به این دلیل، دانش فنی برای تولید قطعات با کیفیت و دقت مطلوب، با این روش درحال گسترش است. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود فرایند هیدروفرمینگ لوله، روش استفاده از فشار داخلی نوسانی است. در عین حال، علت بهبود شکل پذیری در هیدروفرمینگ با فشار نوسانی، به خصوص در حالت قالب بسته، هنوز کاملاً روشن نیست. دراین تحقیق، فرایند هیدروفرمینگ لوله با فشار نوسانی در قالب جعبه‌ای شکل، به کمک روش اجزای محدود و به صورت سه بعدی شبیه سازی شده و ساز و کار بهبود شکل‌دهی، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین، جواب‌های به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی، مقایسه و نشان داده شده است که بهبود شکل‌دهی در اثر فشار نوسانی در مرحله‌ی قبل از تماس لوله و قالب، در ناحیه‌ی انبساط لوله اتفاق می‌افتد؛ از این رو، این نتیجه گیری به عمل آمده است که علت بهبود شکل دهی لوله به رفتار تغییر شکل آن در مرحله‌ی قبل از تماس مربوط می‌شود؛ به نحوی که شکل هندسی لوله در زمان تماس با قالب برای فشار نوسانی به صورت یک برآمدگی مسطح است، درحالی که برای فشارهای غیر نوسانی بالا و پایین، به ترتیب، برجستگی محدب و چروکیدگی اتفاق می‌افتد.*

واژه‌های کلیدی هیدروفرمینگ لوله، فشار نوسانی، شبیه سازی اجزای محدود، بهبود شکل پذیری لوله.

Experimental Study and Numerical study of Pulsating Hydroforming of Tube in Box-Shaped Die

M. Loh-Mousavi   M. Bakhshi-Jooybari   K. Mori   M. Farzin   S.J. Hosseinipour

Abstract *In recent years, the hydroforming has attracted the attention of the automotive industry due to reduction in weight and increase in strength of automotive parts. Thus, the knowledge of the process to produce parts with desired quality and accuracy has been growing. One of the effective methods in improving the formability in the hydroforming is known as pulsating hydroforming. However, the reason of improvement of the formability in pulsating hydroforming is still unclear for the closed-die hydroforming of tubes. In this study, the pulsating hydroforming of tube with box die was simulated by the finite element method to examine the effect of pulsating pressure on improvement of formability. In addition, the calculated results are compared with experimental results and it is shown that the improvement of the formability occurs before contact of the tube and die in expansion zone of the tube. Thus, it can be obtained from the results, that the main reason of improvement of the formability is due to the deformation behavior before start of contact of the tube and die. Flat bulging appears for the pulsating pressure in the former stage, whereas round bulging and wrinkling occur for the high and low non-pulsating pressures, respectively.*

Key Words Tube Hydroforming, Pulsating Pressure, Finite Element Simulation, Improvement of Formability of Tube.

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۵/۱۲/۲۷ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۷/۲/۱٤ به دفتر نشریه رسیده‌است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی‌واحد خمینی شهر
(۲) دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه مازندران
(۳) استاد، دانشکده مهندسی سیستم‌های تولیدی- دانشگاه صنعتی تویوهاشی ژاپن
(٤) دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان
(٥) استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه مازندران

مقدمه

فرایند هیدروفرمینگ لوله، روش نسبتاً جدیدی برای شکل دادن لوله به منظور تولید قطعات توخالی پیچیده است. از مزایای اصلی این فرایند، کم کردن وزن قطعات و کم کردن عملیات جوشکاری است و به همین خاطر درسال‌های اخیر، مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته‌است [1]. در این فرایند، لوله‌های مستقیم و یا خمیده، تحت فشار سیال به اشکال مورد نظر در می‌آید. با انبساط لوله‌ی تحت فشار بالا، ضخامت جداره‌ی آن کاهش می‌یابد. این امر، درنهایت منجر به پارگی لوله می‌شود. برای اجتناب از کاهش موضعی ضخامت جداره‌ی لوله، همزمان با اعمال فشار داخلی، لوله از یک سمت یا هر دو سمت، تحت بار محوری فشاری قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، مقدار ماده‌ی بیشتری در ناحیه‌ی تغییر شکل لوله وارد می‌شود که اصطلاحاً تغذیه‌ی محوری نامیده می‌شود. با این حال، تغذیه‌ی محوری نامناسب منجر به به‌وجود آمدن عیوب دیگری از قبیل چروکیدگی و یا خالی ماندن گوشه‌های قالب می‌شود [2]. به طورکلی، برای تولید یک قطعه‌ی بی‌عیب با ابعاد و تلرانس‌های مورد نیاز، انتخاب مسیر فشار برحسب تغذیه‌ی محوری بسیار مهم است [3].

یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود فرایند هیدروفرمینگ لوله، استفاده از مسیر فشار نوسانی است که به آن هیدروفرمینگ نوسانی لوله گفته می‌شود [4]. در این روش، فشار داخلی برحسب تغذیه‌ی محوری، به‌صورت نوسانی اعمال می‌شود. ساز و کار بهبود شکل پذیری به کمک این روش، با استفاده از امواج اولتراسونیک که روشی برای کم کردن اصطکاک در فرایندهای شکل‌دهی است، متفاوت می باشد؛ زیرا تعداد نوسانات در هیدروفرمینگ نوسانی به مراتب کم‌تر از فرکانس امواج اولتراسونیک می‌باشد [5].

موری و همکارانش، فرایند بشکه‌ای شدن آزاد لوله را تحت فشار نوسانی به کمک یک مدل اجزای محدود متقارن محوری، بررسی کرده‌اند [6,7]. هاما و هم‌کارانش تأثیر فشار نوسانی در بهبود فرایند هیدروفرمینگ یک قطعه‌ی خودرو را به‌وسیله‌ی روش اجزای محدود صریح استاتیکی، شبیه سازی کرده و تأثیر فشار نوسانی را با اثر کاهش اصطکاک لوله و قالب در بهبود شکل پذیری، مقایسه کرده‌اند [8].

نگارندگان مقاله‌ی [9] در پژوهشی دیگر، ساز و کار بهبود شکل‌دهی سه راهی را با استفاده از هیدروفرمینگ نوسانی با روش اجزای محدود صریح دینامیکی، مورد مطالعه قرار داده‌اند. براساس نتایج پژوهش مذکور، فشار نوسانی، ضمن بهبود شکل پذیری، دقت ابعادی و هندسی قطعه را نیز بهبود می‌دهد. از سوی دیگر، تغییر شکل تدریجی تحت فشار نوسانی، امکان تغذیه محوری بیشتری را نسبت به فشار غیرنوسانی فراهم می‌کند؛ از این رو از پارگی لوله تا مرحله‌ی پایانی شکل‌دهی جلوگیری می‌شود.

هم‌چنین نگارندگان مقاله‌ی [10] با کنترل چروکیدگی به کمک فشار نوسانی، مقدار پرشدگی قالب در فرایند هیدروفرمینگ قالب بسته را بهبود دادند.

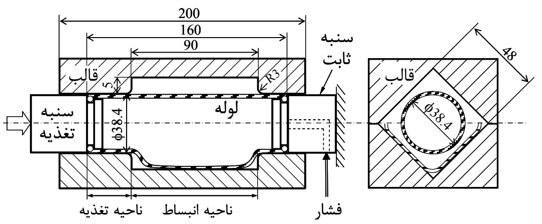
در این مقاله، فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در یک قالب بسته‌ی جعبه‌ای شکل به صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود. هدف از این بررسی، مقایسه‌ی تأثیر فشار نوسانی در قبل و بعد از تماس لوله با قالب در ناحیه‌ی انبساط است؛ به عبارت دیگر، هدف از این مطالعه، پاسخ دادن به این سوال است که آیا تأثیر فشار نوسانی بر شکل پذیری در مقایسه با فشار ثابت، قبل از تماس لوله با قالب که اصطکاکی بین لوله و قالب وجود ندارد بیشتر است، یا در مرحله‌ی تماس با قالب که بین لوله و جداره‌ی قالب، اصطکاک وجود دارد؟

در ادامه، تأثیر فشار نوسانی بر شکل هندسی قطعه و بردار جریان مواد در لحظه‌ی تماس لوله و قالب و هم‌چنین برای مرحله‌ی پایان شکل‌دهی بررسی می‌شوند. درنهایت، منحنی درصد پرشدگی گوشه‌ی قالب، برحسب تغذیه محوری برای فشارهای نوسانی و غیرنوسانی مقایسه می‌شوند.

مراحل آزمایشگاهی

کلیه‌ی کارهای تجربی و مراحل آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه شکل دهی فلزات دانشگاه صنعتی تویوهاشی، در کشور ژاپن به انجام رسیده است.

مجموعه قالب جعبه‌ای شکل استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها و شبیه سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در شکل (۱) نمایش داده شده‌است. لوله از جنس STKMA11، که یک فولاد کم کربن (۰/۰۸٪ C) است، بوده و طول، ضخامت و قطر خارجی آن، به ترتیب؛ ۱۶۰، ۱ و ۳۸/۴ میلی‌متر است. لوله به وسیله سنبه تغذیه از یک طرف با سرعت یک میلی‌متر برثانیه فشرده می‌شود و سنبه‌ی طرف دیگر ثابت است. کل جابه‌جایی سنبه تغذیه ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

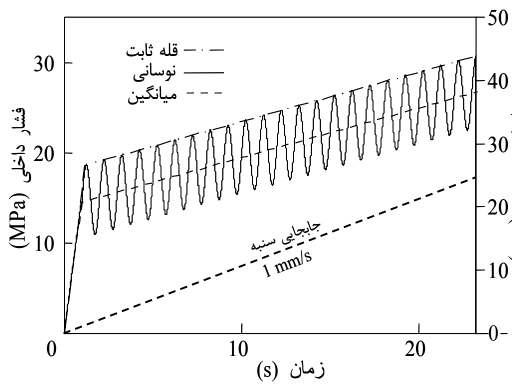


شکل ۱ اجزای مهم قالب و ابزار استفاه شده در هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه‌ای شکل

برای بررسی اثر فشار نوسانی بر توزیع ضخامت و تغییر شکل لوله، مسیر فشار نوسانی نشان داده شده در شکل (۲)، انتخاب شده‌است. علاوه بر این مسیر فشار، به منظور انجام مقایسه، دو نوع مسیر فشار ثابت با مقدار میانگین و مسیر فشار ثابت با مقدار حداکثر (قله) انتخاب گردیده‌اند. معادله‌ی (۱)، بیان‌گر مسیر فشار نوسانی استفاده شده در آزمایش‌ها برحسب زمان انجام فرایند می‌باشد. بزرگی دامنه (Δp) و فرکانس آن (f) فشار نوسانی اعمال شده به ترتیب، برابر ٤ مگاپاسکال و یک هرتز است.

$$p=\Delta p \sin 2\pi f(t-1) + (14+t)\ \text{MPa} \qquad (۱)$$

فشار میانگین، بیان‌گر مقدار متوسط فشارنوسانی در طول انجام فرایند است؛ درحالی که فشار قله، معرف حداکثر مقدار فشار نوسانی می‌باشد. از یک پمپ هیدرولیکی مجهز به شیر خود کار با کنترل کامپیوتری برای اعمال فشار با سه نوع مسیر بالا استفاده شده است. سیال به کار رفته جهت شکل‌دهی لوله، مخلوطی از روغن و آب می‌باشد. سطح خارجی لوله‌ها قبل از انجام هرآزمایش با روغن ماشین، روان‌کاری شده و درصورت بروز پدیده‌ی پارگی لوله در حین آزمایش، فشار داخلی و تغذیه‌ی محوری بی‌درنگ متوقف می‌شود.



شکل ۲ مشخصه‌های فشار استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود و آزمایش‌ها

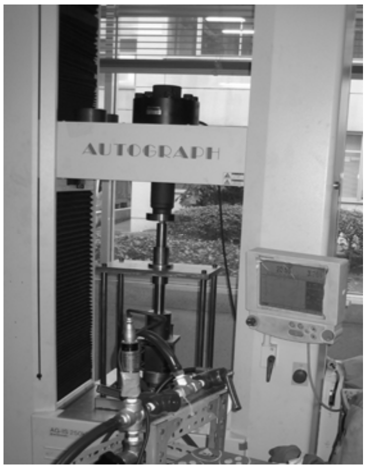
برای انجام فرایند هیدروفرمینگ نوسانی و مطالعه‌ی تأثیر فشار نوسانی بر بهبود شکل پذیری و سازوکار مربوطه، از تجهیزات زیر استفاده شده است:

۱. دستگاه پرس اونیورسال ساخت شرکت شیماتزو (Shimatzu) ژاپن با ظرفیت ۲۵ تن که برای تأمین تغذیه‌ی محوری و فشردن لوله به درون قالب، استفاده شده است. در شکل (۳) دستگاه مذکور به همراه یک مجموعه قالب نشان داده شده است. دستگاه، توسط یک کامپیوتر و یک رابط گرافیکی پیشرفته، کنترل می‌شود که به سادگی، کنترل سرعت و مقدار جابه‌جایی سنبه را میسر می‌سازد.

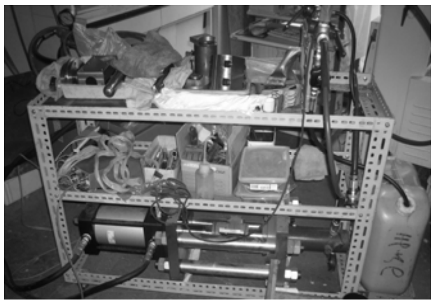
۲. دستگاه تولید کننده‌ی فشار هیدرولیکی نوسانی داخل لوله که در شکل (٤) نشان داده شده است. کامپیوتری که پرس اونیورسال را کنترل می‌کند، کنترل فشار هیدرولیکی را نیز برعهده دارد. بدین

ترتیب، مسیر فشار داخل لوله برحسب مقدار جابه‌جایی و سرعت سنبه به طور هم‌زمان، قابل تعریف وکنترل است. اجزای مهم مجموعه دستگاه هیدروفرمینگ نوسانی در شکل (٤) نمایش داده شده است. حداکثر ظرفیت ایجاد فشار توسط این دستگاه، ۷۰ مگاپاسکال است که برای تولید این میزان فشار، از یک تشدید کننده استفاده شده است.

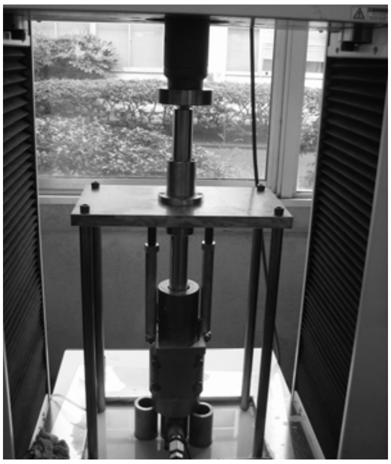
شکل (۵)، تصویر مجموعه قالب و ابزار استفاده شده در آزمایش را نشان می‌دهد. شکل (٦)، تصویر قالب را در این فرایند نشان می‌دهد که از دو نیمه تشکیل شده‌است. برای هر آزمایش، پس از قرار گرفتن لوله در درون قالب، دو نیمه قالب توسط چهار پیچ آلن به هم متصل شدند. برای ساخت قالب جعبه‌ای شکل از دستگاه وایرکات استفاده شده تا حداکثر دقت در ساخت آن رعایت شود.



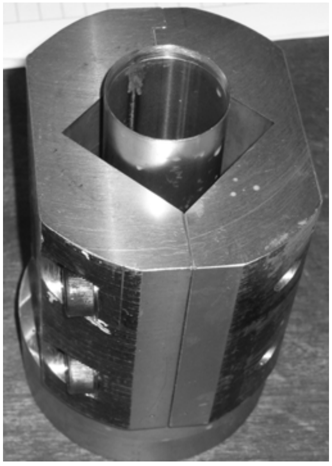
شکل ۳ دستگاه پرس اونیورسال استفاده شده در آزمایش‌ها



شکل ٤ دستگاه تولید کننده‌ی فشار هیدرولیکی نوسانی



شکل ۵ تصویر مجموعه قالب استفاده شده در آزمایش



شکل ٦ تصویر قالب و نمونه‌ی اولیه‌ی لوله‌ی استفاده شده در آزمایش هیدروفرمینگ انبساط لوله در قالب جعبه‌ای شکل

۳. شبیه سازی اجزای محدود: فرایند هیدروفرمینگ لوله‌ی جعبه‌ای شکل در قالب بسته، به کمک نرم افزار اجزای محدود صریح دینامیکی ABAQUS شبیه سازی شد. مطابق شکل (۷)، به خاطر تغییرشکل متقارن لوله، فقط نیمی از اجزای قالب و لوله توسط المان پوسته‌ای، مدل سازی شده است. لازم به یادآوری است که برای انجام تمامی آزمایش‌ها، لوله‌ها به صورتی داخل قالب قرار داده شدند که محل قرار گرفتن خط جوش آن‌ها در قالب پایین، مطابق شکل (۷) در صفحه‌ی تقارن، قالب

می‌باشد.

نوع و تعداد المان استفاده شده برای لوله به ترتیب؛ S4R و ۳٤۰۰ می‌باشد. سطح قالب و سنبه‌ها با المان صلب از نوع R3D4 مدل سازی شده‌اند و از روش پنالتی برای مدل سازی رفتار تماس قالب و لوله استفاده شده است.

جدول ۱ شرایط استفاده شده در شبیه سازی اجزای محدود

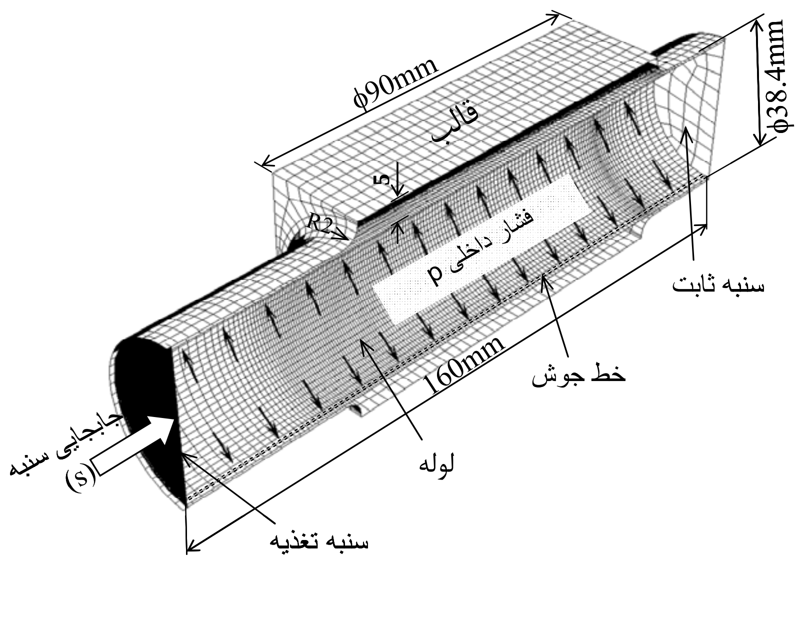
مدول یانگ	۲۱۰ GPa
ضریب پواسون	۰/۳
تنش تسلیم	۲۹۰ MPa
مقاومت نهایی	۳۵۰ MPa
مقدار r	۱/٦
ضریب اصطکاک	۰/۱
قطر خارجی لوله	۳۸/٤ mm
ضخامت جداره‌ی لوله	۱/۱ mm
سرعت سنبه	٦۰ mm/min

شرایط تعریف شده در شبیه سازی اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ، در جدول (۱) آمده است.

تنش جریان و ضریب ناهمسانگردی (مقدار r) برای لوله فولادی کم کربن از جنس STKMA11 بوسیله آزمایش کشش اندازه گیری شده‌است. نمونه‌های آزمون کشش، هم درناحیه جوش و هم بیرون آن ناحیه، تهیه شده‌اند. این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش اونیورسال که درشکل (۳) نشان داده شد، تا حد پارگی کشیده شدند و منحنی نیرو- جابجایی مربوطه ثبت گردید. موقعیت خط جوش مطابق وضعیت آن در آزمایش‌های مربوطه، مدل سازی شد، به نحوی که جنس لوله برای ناحیه جوش و بیرون آن ناحیه متفاوت در نظر گرفته شد. عرض ناحیه جوش برابر با عرض نمونه آزمون کشش در ناحیه جوش فرض شد. معادله‌های ۲ و ۳ به ترتیب برنتایج به دست آمده برای تنش سیلان لوله و خط جوش برازش شده‌است. از معیار تسلیم ناهمسانگردی هیل در تحلیل عددی فرایند استفاده شده‌است.

$$\sigma=510\varepsilon^{0.12}\ [MPa] \quad (۲)$$

$$\sigma=523\varepsilon^{0.1}\ [MPa] \quad (۳)$$



شکل ۷ مدل اجزای محدود فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در قالب جعبه‌ای

نتایج و بحث پیرامون آن

تأثیر فشار نوسانی بر تغییرشکل لوله. شکل (۸)، شبکه‌ی اجزای محدود تغییر شکل یافته را در لحظه‌ی تماس اولیه‌ی لوله و قالب و در پایان فرایند، برای سه مشخصه‌ی فشار: قله، نوسانی و میانگین نشان می‌دهد. شکل هندسی به دست آمده برای فشار نوسانی به صورت یک برآمدگی مسطح است؛ درحالی که برای فشارهای قله و میانگین، به ترتیب، برجستگی محدب و چروکیدگی اتفاق افتاده است. همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود، برای حالت فشار قله، لوله در تغذیه‌ی محوری کم‌تری (s=۱۰mm) در مقایسه با دو مشخصه‌ی فشار دیگر با قالب تماس داشته است و همین امر، موجب تغذیه‌ی نامناسب ماده در انتهای فرایند هیدروفرمینگ و در نتیجه، تجمع مواد اضافی در گوشه‌ی قالب می‌شود شکل(۸- د). از طرف دیگر، مطابق شکل (۸- و) در مرحله‌ی پایانی فرایند، برای فشار میانگین، تغییر شکل کم‌تری نسبت به فشار نوسانی ملاحظه می‌شود.

شکل‌های (۹) و (۱۰) لوله‌های تغییر شکل یافته از آزمایش را به ترتیب برای لحظه‌ی تماس و پایان فرایند نمایش می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی مشابهت نتایج تجربی با نتایج به‌دست آمده از روش اجزای محدود است.

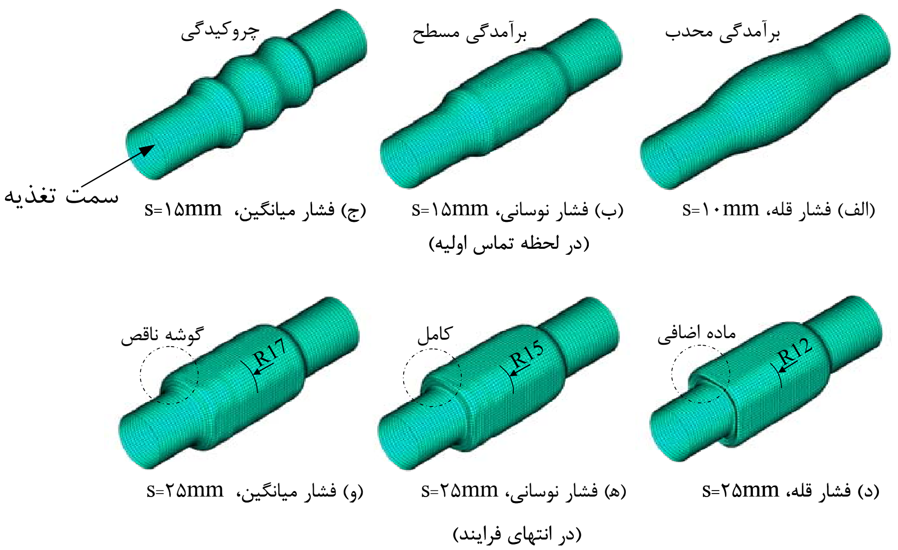
بردارهای جریان مواد مربوط به ناحیه‌ی تغییرشکل لوله در لحظه‌ی تماس اولیه‌ی لوله و قالب و هم‌چنین در پایان فرایند برای سه مشخصه فشار: قله، نوسانی و میانگین، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. بردارهای جریان مواد در لحظه‌ی تماس برای فشار قله و متوسط، یکنواخت نیست؛ به گونه‌ای که بردارهای جریان مواد برای فشار قله در ناحیه‌ی مرکزی برآمدگی لوله، متمرکز شده و برای فشار میانگین، توزیع موجی شکلی را به وجود آورده است. این درحالی است که برای فشار نوسانی، بردارهای جریان مواد، نسبتاً یکنواخت است. در پایان تغذیه محوری (s=۲۵mm)، بردارها برای فشار قله نسبت به فشار نوسانی در ناحیه‌ی ورودی قالب، تمرکز بیشتری دارد. علاوه براین، بزرگی بردارهای جریان مواد برای فشار میانگین در مقایسه با مقادیر آن برای فشار نوسانی، پایین‌تر است.

تأثیر فشار نوسانی بر ضخامت جداره‌ی لوله. نتایج حاصله از شبیه سازی و تجربه برای توزیع ضخامت جداره‌ی لوله‌ی تغییر شکل یافته در شکل (۱۲) نمایش داده شده‌است. مطابق شکل، توزیع ضخامت لوله در مرحله‌ی بشکه‌ای شدن لوله (s=۱۰mm) برای فشار قله، به‌طور قابل ملاحظه‌ای از مقدار آن برای فشار نوسانی پایین تر است و این امر باعث کاهش موضعی جداره‌ی لوله و در نهایت، موجب پارگی آن مطابق شکل (۱۰) می‌شود. به هرجهت همان‌طور که از شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود، اختلاف ضخامت در مرحله‌ی قبل از تماس لوله و قالب، برای فشارهای نوسانی و قله بیشتر از مقدار آن در پایان فرایند است و از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که اثر فشار نوسانی بر بهبود توزیع ضخامت قبل از مرحله‌ی تماس با قالب، بیشتر از زمانی است که لوله در تماس با سطح قالب شکل می‌گیرد. درنتیجه، کاهش اصطکاک در اثر فشار نوسانی نمی‌تواند عامل اصلی بهبود شکل‌دهی باشد؛ زیرا در مرحله‌ی قبل از تماس لوله و قالب، اصطکاک فقط در ناحیه‌ی تغذیه می‌تواند مؤثر باشد که با توجه به تحقیقات قبلی نگارندگان مقاله، فشار نوسانی بر اصطکاک این ناحیه نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای ندارد [5].

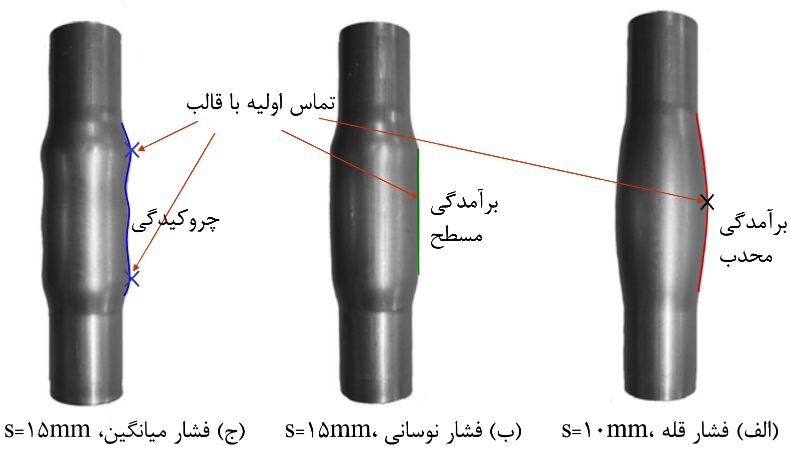
شکل (۱۳)، تغییرات ضخامت لوله را در حین انجام هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل، برای فشار قله و نوسانی نشان می‌دهد. برای فشار قله‌ی ضخامت لوله در ابتدای فرایند به سرعت کاهش می‌یابد؛ درحالی که برای فشار نوسانی، کاهش ضخامت لوله به صورت تدریجی و پله‌ای است. همان‌طور که قبلاً ملاحظه شد، در این‌جا نیز با افزایش تغذیه‌ی محوری و تماس لوله و قالب، اختلاف تغییرات ضخامت برای فشار نوسانی و فشار قله کاهش یافته‌است. به هرجهت، ضخامت جداره‌ی لوله برای

فشار نوسانی تا تغذیه‌ی محوری نهایی (s=۲۵mm) به حد ضخامت پارگی نرسیده‌است؛ درحالی‌که برای فشار قله، کاهش ضخامت منجر به پارگی شده است.

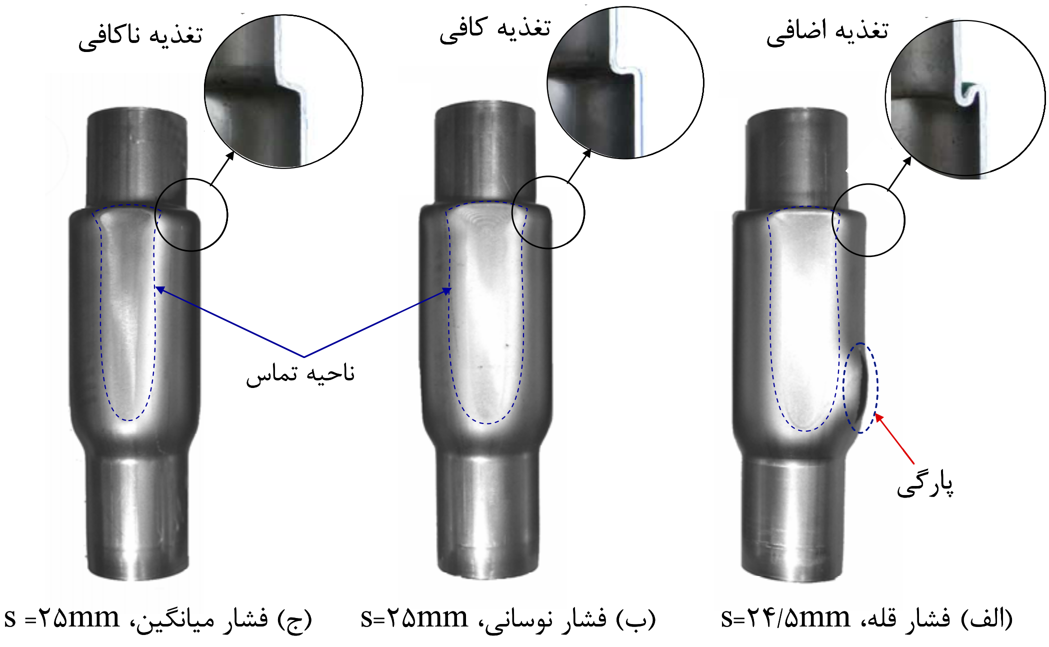
لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری ضخامت جداره‌ی قطعه در مراحل آزمایش از یک دستگاه اندازه‌گیری ضخامت با امواج اولتراسونیک استفاده شد. با توجه به شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که هم‌خوانی قابل قبولی بین نتایج حل اجزای محدود و نتایج تجربی وجود دارد.



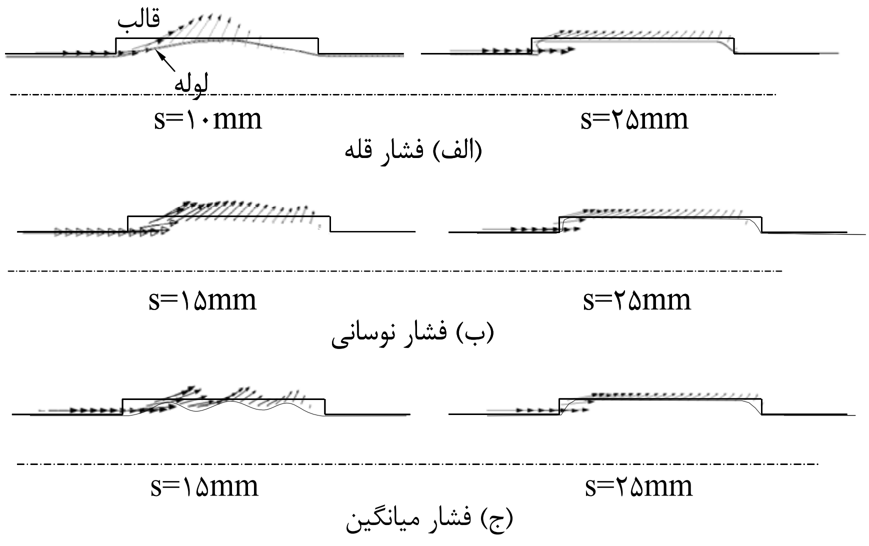
شکل ۸ تغییر شکل شبکه‌های اجزای محدود در لحظه‌ی تماس لوله و قالب و تغییر شکل نهایی؛ s= جابه‌جایی سنبه



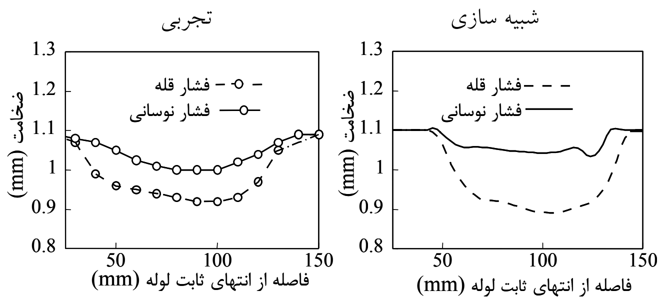
شکل ۹ تغییر شکل لوله در لحظه‌ی تماس با قالب



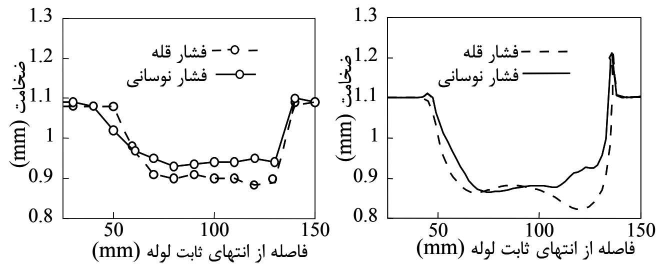
شکل ۱۰ تغییر شکل لوله در پایان فرایند



شکل ۱۱ بردار جریان مواد در لحظه‌ی تماس اولیه‌ی لوله و قالب، در پایان فرایند

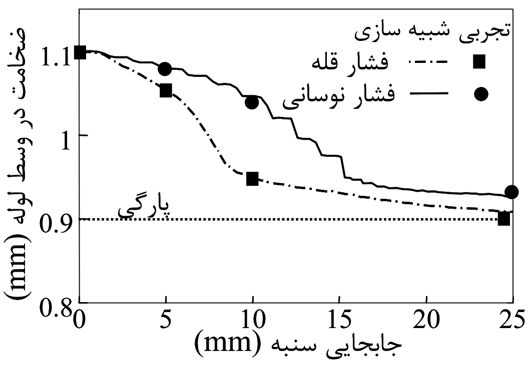


(الف) مرحله‌ی بشکه‌ای شدن آزاد (s=۱۰mm)



(ب) پایان فرایند (s=۲۵mm)

شکل ۱۲ توزیع ضخامت لوله‌ی تغییر شکل یافته



شکل ۱۳ تغییرات ضخامت لوله حین فرایند

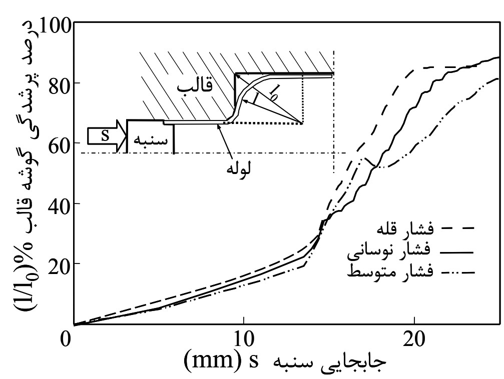
تأثیر فشار نوسانی بر درصد پرشدگی گوشه‌ی قالب. درصد پرشدگی گوشه‌ی قالب، مطابق رابطه‌ی (٤) تعریف می‌شود که در آن l_0 شعاع گوشه قالب و l فاصله‌ی گوشه‌ی لوله از مرکز گوشه‌ی قالب است.

$$\text{درصد پرشدگی گوشه} = 100\times l/l_0 \qquad (٤)$$

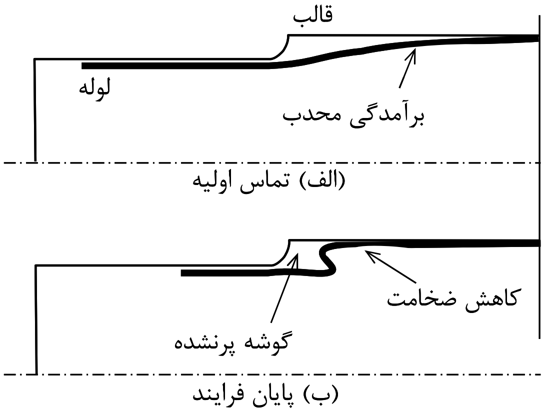
شکل (١٤)، درصد پرشدگی گوشه‌ی قالب را برای سه نوع فشار: قله، نوسانی و میانگین که به کمک تحلیل اجزای محدود به‌دست آمده است، نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش تغذیه‌ی محوری، مقدار پرشدگی گوشه نیز افزایش می‌یابد؛ اگرچه درحین فرایند هیدروفرمینگ در قالب جعبه‌ای، درصد پرشدگی گوشه

قالب برای فشار قله در مقایسه با دو مشخصه‌ی دیگر بیشتر است؛ اما روند افزایش درصد پرشدگی برای جابجایی سنبه در۲۰ میلی‌متر، تقریباً متوقف شده و مطابق شکل (۱۰) به علت نازک شدن جداره‌ی لوله، پارگی اتفاق می‌افتد؛ درحالی که درصد پرشدگی برای فشار نوسانی تا آخرین مقادیر تغذیه‌ی محوری به صورت تدریجی و پله‌ای افزایش یافته و درنتیجه از پارگی لوله و یا تجمع نامناسب مواد در گوشه قالب، جلوگیری می‌شود. از سوی دیگر، درصد پرشدگی گوشه برای فشار نوسانی از مقدار آن برای فشار متوسط نیز بیشتر است.

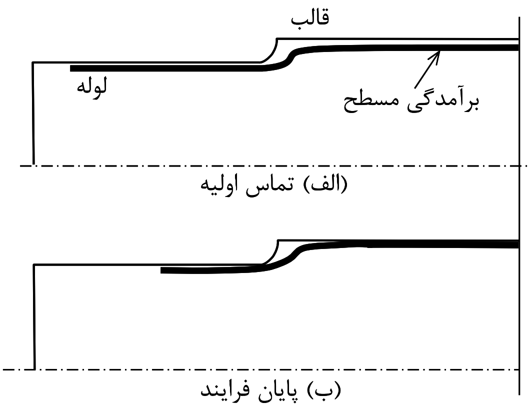
در شکل (۱۵)، شماتیکی از تشکیل گوشه قطعه در هیدروفرمینگ لوله در قالب جعبه‌ای شکل ترسیم شده است. مطابق شکل، به دلیل وجود و تمرکز اصطکاک در ناحیه‌ی شروع تماس لوله و قالب، مواد در قالب به دشواری حرکت می‌کند؛ این درحالی است که اگر تغذیه‌ی محوری برای جبران کاهش ضخامت لوله انجام شود با توجه به شکل محدب ایجاد شده در ناحیه‌ی تغییرشکل لوله، عیب چروکیدگی گوشه به وجود خواهد آمد. برای فشار نوسانی، همان‌طور که در بخش (٤-١) نیز ملاحظه شد، تغییرشکل در ناحیه‌ی شکل‌دهی لوله به صورت یک برجستگی مسطح است که بدین وسیله در حرکت و تشکیل گوشه‌ی قطعه تسهیل شده است (شکل١٦).



شکل ١٤ تغییرات درصد پرشدگی گوشه قالب به دست آمده از شبیه سازی اجزای محدود



شکل ١٥ تشکیل گوشه قطعه درهیدروفرمینگ لوله درقالب جعبه توسط فشار بالا



شکل ١٦ تشکیل گوشه قطعه درهیدروفرمینگ لوله درقالب جعبه توسط فشار نوسانی

نتیجه گیری

تأثیر فشار نوسانی بر شکل‌پذیری و شکل هندسی در فرایند هیدروفرمینگ نوسانی لوله در یک قالب جعبه به‌وسیله‌ی روش اجزای محدود و هم‌چنین روش تجربی بررسی شد. نشان داده شده است که فشار نوسانی باعث بهبود شکل‌پذیری و پرشدگی بهتر گوشه‌های محصول هیدروفرم شده می‌شود. تغییر شکل لوله قبل از تماس با قالب برای فشار نوسانی، به وضوح با هندسه‌ی به دست آمده برای سایر مسیرهای فشار غیر نوسانی، متفاوت است. فشار نوسانی از طریق حذف

مکرر و تدریجی چروک‌های قابل برگشت که در اثر فشار نسبتاً پایین به‌وجود می‌آید، منجر به برجستگی مسطح لوله در ناحیه‌ی تغییر شکل آن می‌شود. برجستگی مسطح و یکنواخت لوله در ناحیه‌ی شکل‌دهی آن، باعث توزیع بهتر ضخامت و درنتیجه جلوگیری از پارگی لوله می‌شود.

به دلیل تغییر شکل مسطح لوله حین شکل‌دهی با فشار نوسانی، نحوه‌ی جریان یافتن ماده در قالب برای فشار نوسانی نیز با شکل جریان مواد برای فشارهای غیر نوسانی متفاوت است. در شکل‌دهی با فشار بالا (قله)، مواد در لحظه‌ی تماس با قالب، تمرکز بیشتری در ناحیه‌ی مرکزی تغییر شکل دارند. با تمرکز مواد در ناحیه‌ی مرکزی در لحظه‌ی تماس، حرکت مواد به سمت گوشه‌های قالب به دلیل اصطکاک بیشتر در ناحیه‌ی مرکزی، محدود می‌شود؛ به طوری که حتی با تغذیه‌ی بیشتر مواد، گوشه‌ی قالب پر نشده و منجر به عیب روی هم افتادگی ورق می‌شود.

مراجع

1. B, J. Mac Donald., and M, Hashmi., "Near-Net-Shape Manufacture of Engineering Components using Bulge-Forming Process", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 120, 341-347, (2002).
2. F, Dohmann., C, Hartl., "Tube hydroforming-research and practical application", *J. Mater. Process. Technol*, 71, 174–186, (1997).
3. M, Koc., and T, Altan., "Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process", *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 42, 123-138, (2002).
4. T, Pogo., M, Ito., and T, Mizuno., "Digital Meister System of Hammering Hydroforming", *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Japan, Vol. 45, No. 527, (2004).
5. K, Mori., T, Maeno., M, Bakhshi.Jooybari., and S, Maki., "Measurement of friction force in free bulging pulsating hydroforming of tubes", in: P.F. Bariani et al. (Ed.), Advanced Technology of Plasticity 2005, Edizioni Progetto Padova, Padova, CD-ROM, (2005).
6. K, Mori, A,U. Patwari and S, Maki, "Improvement of formability by Oscillation of Internal pressure in pulsating hydroforming of Tube", Annals of the CIRP, 53-1, 215-218, (2004).
7. Mori, K. Mori., T,Maeno., S, Maki., "Mechanism of improvement of formability in pulsating hydroforming of tube", *Int. J. of Mach Tools and Manuf*, Vol. 47, 978-984, (2007).
8. T, Hama., M, Asakawa., H, Fukihara., and M, Makinouchi., "Finite Element Simulation of Hammering Hydroforming of an Automotive Component" , Proc. of the TUBEHYDRO 2003, Aichi, Japan, 80-83, (2003).
9. M, Loh.Mousavi., K, Mori., K, Hayashi., S, Maki and M, Bakhshi., "3-D finite element simulation of pulsating T-shape hydroforming of tubes", Key Eng. Mater., 353-358, 340 (2007).

10. M, Loh.Mousavi., K, Mori., K, Hayashi and M, Bakhshi., "Improvement of filling of die corners in box-shaped tube hydroforming by control of wrinkling", Key Eng. Mater, 461-467, 344 (2007).